

Centre d'Etudes, de Documentation
et de Recherche Economiques et
Sociales

AVRIL 2011



ACTES DU COLLOQUE

Tome 3

Thème: « Quelle agriculture pour un développement durable de l'Afrique ? »
Ouagadougou, Burkina Faso - du 6 au 8 décembre 2010

DIRECTEUR DE PUBLICATION

Dr Damien LANKOANDE

COMITE DE REDACTION

Pr Taladidia THIOMBIANO

Dr Karidia SANON

Dr Emile DIALLA

REALISATION

Dr Damien LANKOANDE

M. Issiaka SOMBIE

TOME 3

- **Thématique 5 : Théories, méthodologie et modèles de développement**
- **Thématique 6 : perspectives**

www.cedres.bf



THEMATIQUE 5 : THEORIES, METHODOLOGIE ET MODELES DE DEVELOPPEMENT

L'Afrique au Sud du Sahara possède-t-elle un avantage comparatif dans l'agriculture ?	
DONTSI.....	525-539
Profil de l'agriculture béninoise : analyse des risques et contraintes liées aux conditions de travail des acteurs du secteur	
ACACHA ACAKPO Hortensia Vicentia.....	540-557
Contraintes et performances agricoles au Congo	
NKOUKA Safoulanitou Leonard.....	558-563
Strategies to ensure household food security: agricultural diversification in two regions of Burkina Faso.	
TINCANI Lucrezia.....	564-573
Infrastructures de commercialisation et approvisionnement vivrier des grandes villes au Benin	
HONAGBODE A. Cyrille.....	574-583
La controverse théorique et empirique posée par le comportement des producteurs-consommateurs du Burkina Faso	
THIOMBANO Taladidia.....	584-597
Les déterminants de l'utilisation des déchets organiques au Cameroun : Une analyse économétrique	
SOTAMENOU Joël.....	598-614
Identification et évaluation de l'effet des polyphénols des folioles de palmier à huile (<i>elaeis guineensis</i> jacq) sur le développement des larves de <i>coelaenomenodera lameensis berti</i> (coleoptera : chrysomelidae –hispanae) infectant ces palmiers.	
FAGBOHOUN Louis, COFFI Alassan, GBAGUIDI Fernand A., MOUDACHIROU Mansourou & MOREL Gilles.....	615-629
Évolution des potentialités agro-climatiques dans le bassin de l'Oueme au Pont de Save (Benin)	
OGOUWALE Romaric, HOUSSOU Christophe & BOKO Michel.....	630-639
Agricultural land expansion and productivity in Côte d'Ivoire	
DJEZOU Wadjamsse Beaudelaire.....	640-656
Dynamique à court terme et prévision des prix des céréales au Burkina Faso : Approche par la cointégration	
SAWADOGO Ibrahim, KABORE Moussa, KOURSANGAMA Adama & GUISSOU Richard.....	657-667
Sur la diversification agricole optimale en présence des coûts de transaction	
HONLONKOU Albert N.....	668-684
The role of agriculture as a driver to reduce poverty in Sub Sahara Africa (SSA)	
BAKWOWI Jeshma Ntsou.....	685-697
Agrotourism development in Taiwan	
CHEN Hsueh – Liang.....	698-702
Couplage entre développement agricole et alimentation scolaire en Afrique subsaharienne : Une perspective théorique	
SUMBERG James & SABATES-WHEELER Rachel.....	703-717
Langues, transfert et appropriation des savoirs et technologies agricoles en situation multilingue : Cas du Burkina Faso	
SAWADOGO Emmanuel.....	718-726

THEMATIQUE 6 : PERSPECTIVES

Transferts fonciers intergénérationnels, développement durable et sécurisation foncière au Burkina Faso	
BOLOGO Arzouma Eric.....	727-739
Validation d'un modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation coton-céréales-élevage dans l'ouest du Burkina Faso	
SEMPORE A. W., ANDRIEU N. & SEDOGO M.P.....	740-752
Agriculture tropicale et crises environnementales au nord-Cameroun. Quelles stratégies de production face aux défis du développement?	
FIDESSOU Sylvestre.....	753-763
Pauvreté, diversification rurale et transitions africaines : Etat des lieux et perspectives à partir d'analyses croisées de situations régionales dans quatre pays	
FREGUIN-GRESH Sandrine, BA Cheikh Oumar, BELIERES Jean-François, LOSCH Bruno & RANDRIANARISON Lalaina.....	764-777
Nouvelles politiques agricoles et changements climatiques : Approche de production écologique	
ISSA Zeinabou.....	778-789
Nouvelles stratégies de recherche	
ISSA Mamoudou.....	790-796
Gender-responsive agricultural policies: the way forward for food security in Africa	
NGENWI A. A., TABI F.O., MAFENI J.M. & ETCHU K.A.....	797-805
Reconnaissance de la location des terres et définition des baux ruraux. Perspectives d'ancrage de la sécurisation foncière au Burkina	
TALLET Bernard.....	806-819
Effectivité des transports routiers et développement de l'agriculture dans l'espace UEMOA	
NOYOULEWA Adong Tchoou.....	820-835
Quelle agriculture pour un développement durable du continent africain ?	

AMOUSSA Rafiatou.....	836-843
Femmes et agriculture biologique dans la commune de Seguenega: Vers une approche de la contribution du genre a l'intensification des systèmes de production agricole	
BELEM Bassirou, BELEM Kalifa, THIOMBIANO N. D. E. & LUMUMBA Joseph.....	844-855
Réflexion sur la question de l'agriculture durable et quelques éléments du climat	
BOKO N. P. Maximilien ; YABI Ibouaïma; OGOUWALE Euloge; HOUSSOU S. Christophe, BOKO Michel.....	856-864
Professionnalisation des producteurs : élément de riposte a la déstructuration des filières agricoles	
AKA Frédéric Adié.....	865-875
Amélioration de la politique et techniques d'organisations fonctionnelles des dangers agricoles en Afrique subsaharienne: Enjeux et méthodes.	
DJOUBEROU Narcisse.....	876-886

**VALIDATION D'UN MODELE DE SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DE L'EXPLOITATION
COTON-CEREALES-ELEVAGE DANS L'OUEST DU BURKINA FASO**

SEMPORE A. W.^{1*}, ANDRIEU N.², SEDOGO M.P.³

**¹Centre International de Recherche-développement sur l'Elevage en zone Subhumide (CIRDES)
Bobo-Dioulasso Burkina Faso,**

**²CIRAD, UMR Innovation, Bobo Dioulasso, Burkina Faso ; CIRAD, UMR Innovation, Montpellier, F-34398 France;
CIRDES, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso**

³INERA, Kamboinsin (Ouagadougou), Burkina Faso

*** semporearistide@yahoo.fr**

RESUME

Le projet CORUS, initié depuis 2007 au sein du Centre International de Recherche-Développement sur l'Elevage en zone Subhumide (CIRDES) a pour but de co-construire avec les producteurs des outils de dialogue et de diagnostic pour mesurer les impacts de scénarios de changement sur le fonctionnement et les performances des unités de production en zone cotonnière. Dans cette optique, un modèle de simulation du fonctionnement des exploitations a été élaboré sous Excel. Une étude a été réalisée dans les villages de Koumbia et de Kourouma de l'Ouest du Burkina Faso afin de valider le modèle. Cette communication présente les résultats obtenus dans le cas de 26 exploitations souhaitant planifier leur campagne agricole. Des séries de suivis, d'analyses (sols et fumure organique) et de mesure de production agricole (coton, céréales) ont été effectuées sur les parcelles de ces exploitations. Les données recueillies ont été comparées aux données simulées. L'analyse statistique a montré une différence significative entre productions agricoles simulées et mesurées mais elle a été non significative entre les charges économiques virtuelles et réelles. Cette analyse a permis non seulement d'améliorer la structuration du modèle mais aussi d'aider les exploitants à la réflexion sur des modifications décisionnelles.

Mots clés : *modèle de simulation, validation, innovation technologique, exploitation agricole, Burkina Faso*

I. INTRODUCTION

L'agriculture des pays d'Afrique Subsaharienne est caractérisée par sa faible productivité. Au Burkina Faso, les faibles rendements des cultures sont souvent expliqués par les conditions pluviométriques défavorables, la pauvreté naturelle des sols en éléments nutritifs et la faible utilisation des engrais (Sedogo, 1993 ; Bado et *al.*, 1997a et 2000). Les engrais minéraux sont très peu utilisés (N'Diaye et *al.*, 1999) et l'utilisation des engrais organiques est également faible car l'agriculture n'est pas systématiquement intégrée à l'élevage. La baisse de la pluviosité et la variabilité climatique rendent très aléatoires la productivité végétale et animale.

Parallèlement, la forte croissance démographique des dernières années a entraîné une forte pression sur les ressources en terres cultivables et pastorales (Lhoste, 1988 ; INERA/CIRDES, 1997). L'augmentation de la population est accompagnée de celle du cheptel entraînant du même coup un accroissement de la demande en produits végétaux utiles à l'homme et à l'animal. Cette forte pression sur le couvert végétal influence la capacité des sols à produire la biomasse nécessaire aux besoins croissants des populations humaine et animale. La jachère qui était le moyen traditionnel de restauration de la fertilité des sols est de moins en moins pratiquée à cause de la forte demande en terres cultivables (Boyer, 1982 ; Bacye, 1993 et Pieri, 1989). On assiste alors à de nombreux conflits entre les éleveurs en quête de pâturages pour leurs troupeaux et les agriculteurs en quête de terres cultivables.

Face à une telle situation, couplée à l'instabilité de l'environnement économique (hausse du prix des intrants, baisse du prix du coton), il devient urgent de repenser les modes de gestion des exploitations. C'est dans ce contexte qu'un modèle de simulation simple a été mis en place par le projet Corus « *Rôle de la modélisation pour la gestion durable des systèmes de production coton-céréales-élevage en Afrique de l'Ouest* ». Ce modèle simule la production animale et végétale de l'exploitation en tenant compte des règles de décision du producteur afin d'aider à la conception d'innovations techniques et organisationnelles (Andrieu et *al.*, 2009). Selon Dzotsi (2002), pour qu'un modèle soit adopté par un praticien, il doit répondre aux attentes de ce dernier et faire l'objet d'une démonstration de sa validité à travers une comparaison entre les valeurs mesurées sur le terrain et les valeurs simulées par le modèle. C'est dans cette optique de démonstration de la validité du modèle de simulation que s'inscrit la présente étude dans la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer la possibilité de simuler avec une marge d'erreur limitée le fonctionnement d'exploitations coton-céréales-élevage de l'Ouest du Burkina Faso à travers l'analyse du bilan alimentaire, du bilan minéral du sol et du solde économique de l'exploitation. Il consiste en d'autres termes à valider un modèle agronomique à l'échelle de l'exploitation.

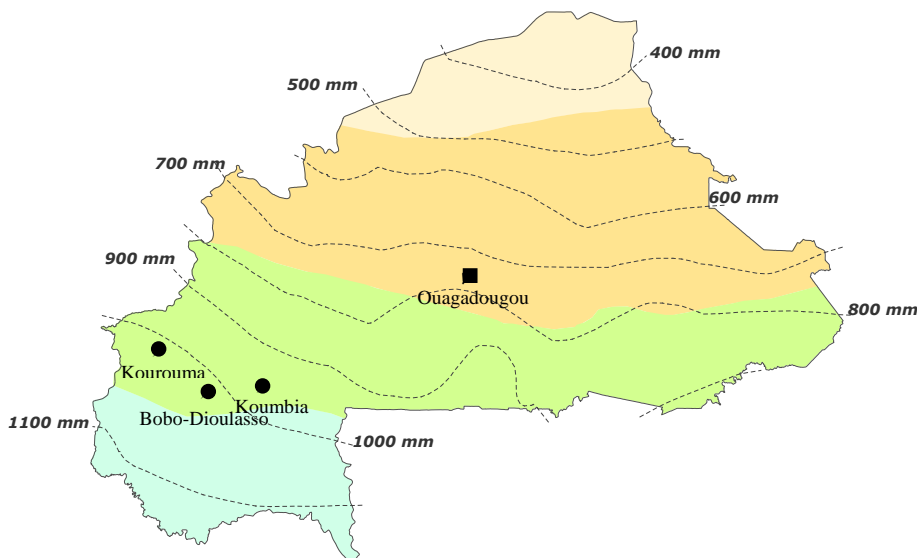
La présente communication propose en premier lieu de décrire la méthodologie adoptée et le modèle de simulation utilisé. Elle compare ensuite à l'échelle de l'exploitation, la production agricole (cultures de rente et céréalière) et les bilans minéraux réels à ceux obtenus par simulation. Les écarts entre les charges économiques réelles liées aux cultures et les charges économiques calculées par le modèle sont enfin évalués.

II. Matériel et méthode

2.1. Zone d'étude

Cette étude a été menée dans deux villages, Koumbia et Kourouma situés dans la zone soudanienne à l'Ouest du Burkina (figure 1).

Figure 1 : localisation des deux villages (adaptée par Andrieu et *al.*, 2009)



Koumbia (Latitude 12°42'20''Nord; longitude 4°24'01''Est ; altitude 290 m) est une commune rurale de la province de Tuy située à 67 km à l'Est de Bobo-Dioulasso. L'emprise agricole est estimée à 35% de la surface du territoire villageois et la densité du bétail est de 45 UBT/km² (Corus, 2007). Les systèmes de production sont principalement composés de céréaliculture, de cotonculture et d'élevage bovin (Diallo, 2006). La typologie des unités de production de Koumbia et Waly réalisée par Blanchard (2005), a mis en évidence trois principaux types de systèmes de production : les éleveurs (9%), les agriculteurs (84%) et les agro-éleveurs (7%).

Le village de Kourouma (Longitude 30°45'59'' Ouest ; latitude 12°87'29'' Nord et 337 m d'altitude) se situe dans la province du Kénédougou, à 83 km au Nord-Ouest de Bobo-Dioulasso. L'emprise agricole est estimée à 45% de la surface du territoire villageois et la densité du bétail est de 50 UBT/ km² (Corus, 2007). Dans ce village, Daho (2006), a identifié trois grands groupes d'unités de production à l'image de ceux identifiés à Koumbia à savoir les agriculteurs (73%), les agro-éleveurs (17%) et les éleveurs (10%).

2.2. Le modèle

Le modèle utilisé dans cette étude simule le fonctionnement technico-économique d'une exploitation à l'échelle d'une année et permet d'analyser l'impact d'une transformation de l'exploitation liée par exemple à la modification de l'assolement, l'amélioration de la production de fumure organique, l'introduction d'un atelier d'embouche (Andrieu et *al.*, 2009). L'année simulée est divisée en trois saisons : la saison pluvieuse, la saison sèche chaude, la saison sèche froide. Pour chaque saison, le modèle calcule en fonction des données entrées par l'utilisateur - caractéristiques structurelles de l'exploitation, décisions stratégiques et tactiques, type d'année - trois principaux bilans : le bilan alimentaire, le bilan minéral, le bilan fourrager ainsi que le solde économique des activités agro-pastorales. Les décisions renseignées par l'utilisateur concernent le choix d'assolement, les achats et ventes d'animaux, la part des résidus de culture disponibles récoltés, la valorisation de la matière organique et les apports de fertilisants chimiques.

Le modèle a été développée sous Excel. Ce langage est plus facile à maîtriser que d'autres langages plus complexes et permet par conséquent d'aboutir à un prototype fonctionnel en très peu de temps. Il comporte sept modules reflétant les interactions entre systèmes de culture et d'élevage au sein des exploitations. Il s'agit des modules : ressources de l'exploitation, système d'élevage, système de culture, ration, production de fumure organique, fertilisation et économie de l'exploitation.

2.3. Collecte et analyse des données

L'analyse s'est appuyée sur le suivi de 26 exploitations (12 à Kourouma et 14 à Koumbia) retenues sur la base du volontariat et de la disponibilité du chef d'exploitation. En plus de ces deux critères, chaque exploitation répondait à l'un des trois grands types d'unités de production à savoir les agriculteurs, les agro-éleveurs et les éleveurs.

L'étude a consisté à une comparaison de certaines sorties du modèle aux résultats d'observation de terrain (tableau I). Ces sorties ont concerné 3 modules (le module système de culture, le module fertilisation des cultures et le module économique lié à l'agriculture) du modèle.

Le tableau I présente la façon dont on a procédé pour collecter les données de terrain ainsi que celles qui ont servi pour la simulation.

Tableau I : Protocole de collecte des données

Modules	Sorties	Recueil des données mesurées	Recueil des données pour les simulations
Système de culture	rdt coton	Pose de 3 carrés de rendement (9m ²) suivant la diagonale dans chaque parcelle de culture et par exploitation ; Mesures de poids (poids humide au champ et poids sec après séchage) à la récolte et évaluation des rendements.	Suivis périodiques (chaque 15jours) de toutes les activités agricoles auprès des 26 chefs d'exploitations durant la campagne hivernale 2009-2010 ; Activités agricoles concernées : superficie et itinéraire technique de chaque culture (fiche de suivi en annexe 2)
	rdt maïs		
	rdt sorgho		
	rdt CS		
	rdt maïs paille		
	rdt sorgho paille		
	rdt fanes CS		
Fertilisation	Bilans en N sur le coton, maïs, sorgho et CS	<u>2 séries de prélèvements de sol</u> 1 ^{ère} série : juste avant le début de la campagne hivernale (mai) sur les parcelles destinées aux différentes cultures concernées ;	Suivis périodiques (chaque 15jours) de toutes les activités agricoles auprès des 26 chefs d'exploitations durant la campagne hivernale 2009-2010 ; Activités agricoles concernées : quantités de FO, NPK et Urée épandues sur les différentes cultures
	Bilans en P sur le coton, maïs, sorgho et CS	2 ^e série : après la campagne hivernage (décembre) sur les mêmes parcelles concernées par la 1 ^{ère} série.	
	Bilans en K sur le coton, maïs, sorgho et CS	<u>1 série de prélèvements de fumure organique</u> avant la campagne hivernale ; Echantillons de sols et FO analysés au laboratoire Sol-Eau-Plante du programme GRN-SP/Ouest (INERA/Farako-Ba)	
Economique	Charges liées à l'agriculture	Suivis périodiques (chaque 15jours) de toutes les activités agricoles auprès des 26 chefs d'exploitations durant la campagne hivernale ; Activités agricoles concernées : achats des intrants agricoles, rémunération de la main d'œuvre (MO) et autres.	Suivis périodiques (chaque 15jours) de toutes les activités agricoles auprès des 26 chefs d'exploitations durant la campagne hivernale 2009-2010 ; Activités agricoles concernées : quantités d'herbicide et d'insecticide utilisés sur les cultures, nombre de jours payés à une MO extérieure, dépenses liées à l'achat d'équipement.

Rdt : rendement, CS : culture secondaire, MO : main d'œuvre, FO : fumure organique ; N : azote ; P : phosphore ; K : potassium

Le nombre de parcelles par village et par culture utilisé pour la validation des sorties du module système de culture est consigné dans le tableau II.

Tableau II : Nombre de parcelles par culture pour chaque village

Cultures	Maïs	Sorgho	coton	niébé	Total
Koumbia	17	9	9	7	42
Kourouma	15	6	9	8	38
Total	32	15	18	15	80

La validation d'un modèle consiste à comparer les variables de sortie du modèle et les résultats d'observation de terrain (Bouazzama et al., 2007 ; Bamba, 2008). Parmi les critères statistiques généralement utilisés pour la validation on a la Normality Root Mean Square Error (NRMSE) et le coefficient de corrélation (r).

La RMSE (ROOT MEAN SQUARE ERROR) est la racine carré de la moyenne des écarts quadratiques entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle. Une valeur proche de zéro indiquerait que les valeurs calculées par le modèle sont proches des valeurs observées (Fox, 1981).

$$la\ MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2$$

$$la\ RMSE = \sqrt{MSE}$$

Avec Y_i la valeur observée et Y'_i la valeur calculée par le modèle et N le nombre d'observations

Pour faciliter les comparaisons, il est bon de la relativiser en l'exprimant en pourcentage des moyennes mesurées des variables (**NRMSE**). Ce pourcentage représente l'erreur de prédiction (Kobayashi et Us Salam, 2000).

NRMSE = (RMSE×100)/Moyenne des valeurs mesurées.

Le coefficient de corrélation « r ». Il indique l'existence ou la non existence d'une relation linéaire entre les valeurs observées et les valeurs calculées (Addiscott et Whitmore, 1987).

$$r = \frac{\hat{\sigma}_{yy'}}{\hat{\sigma}_y^2 \hat{\sigma}_{y'}^2}$$

Où $\hat{\sigma}_y^2$, $\hat{\sigma}_{y'}^2$ et $\hat{\sigma}_{yy'}$ sont respectivement les variances estimées de Y , Y' , et la covariance estimée de Y et Y' .

Pour r allant de : 0,0 à 0,3 : très faible corrélation (TfC) ; 0,3 à 0,5 : faible corrélation (fC); 0,5 à 0,7 : moyenne corrélation (MC); 0,7 à 0,9 : forte corrélation (FC); 0,9 à 1,0 : très forte corrélation (TFC).

Pour la réalisation de ces différentes analyses statistiques, nous avons utilisé le programme IRENE (Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates) qui est un outil d'analyse de données conçu pour fournir un accès facile aux techniques statistiques d'évaluation des modèles.

III. Résultats

3.1. Validation du module système de culture

Les tableaux III et IV présentent les valeurs des indices statistiques obtenues en faisant la comparaison entre les données de production en grain mesurées sur le terrain (Koumbia/ Kourouma) et celles simulées. Dans l'ensemble, la NRMSE s'éloigne de la valeur optimale (0%). On note à travers r que les rendements de coton, maïs et sorgho grain sont fortement corrélés linéairement aux rendements simulés à Koumbia. A Kourouma on a une très forte corrélation linéaire entre les productions en grain de coton, maïs et niébé simulées par rapport à celles mesurées.

Tableau III : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en grain (Koumbia)

Indices	Prod cg	Prod mg	Prod sg	Prod csg	Valeur optimum
Nb P	9	13	8	7	-
M mesurée	3213	8203	2756	294	-
M simulée	2583	7769	2437	545	-
NRMSE	60%	69%	95%	160%	0%
r	0,82	0,81	0,96	0,69	1
signification r	FC	FC	TFC	MC	-

Prod : production ; **Nb P** : Nombre de parcelle ; **M** : moyenne ; **cg** : coton graine ; **mg** : maïs grain ; **sg** : sorgho grain ; **csg** : culture secondaire grain.

Tableau IV : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes productions en grain (Kourouma)

Indices	Prod cg	Prod mg	Prod sg	Prod csg	Valeur optimum
Nb P	9	12	6	7	-
M mesurée	9854	19194	1340	243	-
M simulée	6972	13216	1250	350	-
NRMSE	61%	73%	62%	144%	0%
R	0,91	0,93	0,69	0,96	1
signification r	TFC	TFC	MC	TFC	-

D'après ces deux tableaux (tableaux III et IV), il s'est avéré que le modèle ne prédit pas de façon adéquate les productions en grain des cultures de coton, maïs, sorgho et niébé. En effet, les écarts entre les données simulées et celles mesurées sont statistiquement importants. On note dans l'ensemble une sous-estimation des productions en coton, maïs et sorgho grain simulées par rapport à celles mesurées. La sous estimation des productions en grain de coton, maïs et sorgho peut s'expliquer par le fait que le modèle ne prend pas en compte l'apport des fertilisants organiques et minéraux dans l'élaboration des rendements. Hors, les rendements en milieu réel diffèrent généralement d'un producteur à un autre en fonction des itinéraires techniques et des modes de gestion des assolements. Hypothèse qui a fait l'objet d'une vérification par plusieurs auteurs dont Sedogo (1981), Koulibaly (1992), Ahn (1993), Dakouo *et al.* (1995) et Bado (2002). On observe par contre une bonne corrélation linéaire entre les données simulées et celles mesurées. En effet, cet indice ne nous permet pas de dire que le modèle simule finement les sorties mais il montre qu'il existe une bonne liaison entre les données simulées et celles mesurées. Amas (1999), avait démontré que la validation des modèles de simulation des systèmes est très compliquée liée au fait que les données des paramètres des modèles sont rarement bien définies. Pour lui, il peut exister des hétérogénéités au niveau des données mesurées dues à la variabilité des pratiques agricoles qui ne permettent donc pas une validation concluante. D'autres auteurs (Monteith, 1996 ; Cournut, 2001 ; Woodward et Rollo, 2002 ; Cros *et al.*, 2003) ont abondé dans le même sens. Mais il faut signaler que l'objectif qui a sous tendu l'élaboration du modèle n'était pas de reproduire exactement la réalité mais de présenter des tendances de la réalité afin de susciter des discussions entre conseillers techniques et les producteurs, les forts coefficients de corrélation montre que le modèle est capable de simuler ces tendances. De plus la sous estimation de la production par le modèle peut permettre aux futurs utilisateurs de prodiguer plus de conseils aux agriculteurs afin qu'ils puissent maximiser leur production. Car une surestimation peut artificiellement entraîner des bilans céréalier ou économique positifs pouvant faussement rassurer le producteur.

3.2. Validation du module fertilisation

3.2.1. Validation des sorties quantité de fumure organique apportée

Le tableau V présente les apports moyens simulés et mesurés de fumure organique (FO) sur les parcelles de coton, maïs et sorgho. Les apports d'éléments minéraux sont déduits des apports de fumures organique et minérale. Dans le modèle, la fumure minérale est renseignée par le producteur alors que la production de FO est calculée en fonction de la production de déjections des animaux et de résidus de récoltes. Ainsi, nous nous sommes focalisé sur les apports de FO.

L'erreur de prédiction (NRMSE) entre les apports de FO virtuels et réels est supérieure à 100% au niveau des cultures de coton, maïs et sorgho à Koumbia et au niveau du maïs à Kourouma. On remarque que les apports moyens par simulation de FO sur les parcelles de maïs sont près de deux fois supérieurs à ceux mesurés expérimentalement. Les apports moyens de FO par simulation sur les parcelles de coton à Koumbia sont nuls. A Kourouma, aucune parcelle de coton et de sorgho n'a reçu de fumure organique.

Tableau V : Apports moyens simulés et mesurés d'éléments fertilisants (Koumbia/ Kourouma)

Cultures	Coton			Maïs			Sorgho		
Ap (kg/ha)	mS	mM	NRMSE	mS	mM	NRMSE	mS	mM	NRMSE
Nb P	9	9		13	13		8	8	
FO (Kbia)	0	422	157%	3340	1811	133%	1333	500	412%
FO (Kma)	49,7	0	-	3192	1487	165%	1118	0	-

Ap : apport **Nb P** : nombre de parcelle ; **FO** : fumure organique ; **mS** : moyenne simulée ; **mM** : moyenne mesurée ; **Kbia** : Koumbia ; **Kma** : Kourouma

L'analyse du tableau montre que les apports virtuels de FO sur les parcelles de maïs et de sorgho dépassent ceux apportés sur le terrain. Dans le modèle, le producteur renseigne sur le devenir des déjections émanant de son troupeau qui peuvent soit être récoltées sous forme de poudrette de parc, de fumier de fosse ou non valorisées. La quantité de déjection dépend du nombre d'animaux présents dans l'exploitation. Ainsi, toute la production virtuelle de fumure organique (en tenant compte des pertes) est apportée en premier lieu sur les parcelles de maïs. La quantité à appliquer à l'hectare est plafonnée à 6 tonnes (dose recommandée par Berger *et al.* (1987) tous les 3 ans) sur les parcelles de maïs et le surplus éventuel est déversé d'abord sur le coton et ensuite sur le sorgho. Au niveau des deux villages, aucun producteur n'a pu sur le terrain apporter les 6 tonnes par hectare de fumure organique sur les parcelles de maïs ; d'où ces apports de FO virtuelles deux fois supérieurs sur les parcelles de maïs par rapport à ceux mesurés expérimentalement. Ce constat est dû à une production de fumure organique insuffisante au sein des exploitations. De plus, l'apport de fumure organique n'est pas systématiquement reparti sur l'ensemble des parcelles de maïs de l'exploitation. En effet, l'apport systémique de la FO sur les parcelles de

cultures dans les villages est conditionné d'une part par sa disponibilité en quantité suffisante et d'autre part par la disponibilité de la main d'œuvre et des moyens de transport de l'exploitation.

Il est à noter que le modèle simule bien l'apport privilégié de la FO sur le maïs même s'il surestime cet apport. Pour élaborer le premier prototype du modèle, Schaller (2008), a identifié parmi les règles de décision des producteurs de Koumbia, que la FO (stock de fumier et de déjection) était appliquée en premier lieu sur les parcelles de maïs. Cette règle a été vérifiée dans notre étude car tous les producteurs des deux villages disposant de FO, l'ont d'abord appliqué sur les parcelles de maïs ensuite sur les autres parcelles (qui seront destinées pour les cultures de coton, sorgho). Par voie de conséquence, les quantités mesurées de FO sur les parcelles de coton et sorgho dans les deux villages sont faibles voire nulles.

Le calcul des apports par le modèle permet au producteur d'estimer la quantité de FO qu'il pourra obtenir lorsque le troupeau et les déjections émanant de ce troupeau sont gérés de façon plus rationnelle.

3.2.2. Validation de la sortie bilan minéral

Les tableaux VI et VII présentent les indices statistiques calculés pour les bilans minéraux mesurés et simulés dans les villages de Koumbia et Kourouma. La comparaison des bilans minéraux mesurés (N, P₂O₅ et K₂O) des précédents coton, maïs et sorgho à ceux simulés n'a pas révélé de conformité entre eux. Seuls les bilans en P₂O₅ du précédent coton à Koumbia et du précédent sorgho à Kourouma sont moyennement corrélés.

Tableau VI : Valeurs des indices statistiques calculés pour les différents bilans minéraux (Koumbia)

Cultures	Coton			Maïs			Sorgho		
Indices	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Nb P	9	9	9	13	13	13	8	8	8
mM (kg/ha)	665	-1	-1	768	9	-27	570	-4	-65
mS (kg/ha)	-11	16	2	22	21	-9	-15	-10	-33
NRMSE (%)	115	-10375	-5432	126	248	-538	226	-307	-379
r	0,14	0,6	-0,64	0,06	-0,12	0,07	0,44	-0,13	0,28
signification r	TfC	MC	NC	TfC	NC	TfC	fC	NC	TfC

Tableau VII : valeurs des indices statistiques calculés pour les différents bilans minéraux (Kourouma)

Cultures	Coton			Maïs			Sorgho		
Indices	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Nb P	9	9	9	12	12	12	6	6	6
mM (kg/ha)	517	5	-0,89	808	25	76	833	-8	-74
mS (kg/ha)	-16	16	2	28	19	-15	-28	-8	-37
NRMSE (%)	131	282	-15842	124	155	331	110	-133	-358
r	-0,13	0,09	0,26	-0,27	-0,04	-0,41	-0,30	0,52	0,27
signification r	NC	TfC	TfC	NC	NC	NC	NC	MC	fC

mM : moyenne mesurés ; **mS** : moyenne simulée ; **Nb P** : nombre de parcelle

Les bilans minéraux mesurés expérimentalement d'après les deux tableaux (VI et VII) s'éloignent de ceux obtenus par simulation. Les bilans azotés réels sont globalement supérieurs aux bilans virtuels. Le modèle calcule les exportations d'éléments minéraux par les cultures en fonction d'une production moyenne de biomasse par culture que multiplie un besoin en élément par tonne de biomasse. Cette production qui est de 1,146 tonne/ hectare pour le coton, 1,865 tonne/ hectare pour le maïs et 1,055 tonne/ hectare pour le sorgho est en deçà de celle mesurée expérimentalement pour le coton et le maïs (1,27 tonne/ hectare pour le coton, 2,75 tonne/ hectare pour le maïs et 0,9 tonne/ hectare pour le sorgho). Par conséquent les exportations de biomasse simulées sont potentiellement inférieures aux exportations réelles. Le tableau V a mis en évidence des apports de FO simulés globalement supérieurs à ceux mesurés expérimentalement pour le maïs. Le fait que les bilans minéraux réels diffèrent des bilans virtuels peut alors s'expliquer par un problème de paramétrage au niveau de la teneur en éléments minéraux de la biomasse cultivée ou de la fumure organique ou une non prise en compte par le

modèle de certains apports ou exportations d'éléments minéraux. Bien qu'ils soient difficiles à évaluer, plusieurs auteurs dont Piéri (1989), Sedogo (1993) soutiennent que les pertes (par érosion, par lessivage ou lixiviation, pertes gazeuses, etc.) et les gains (par les dépôts atmosphériques, fixation biologique, etc.) sont non négligeables. Des bilans positifs en azote ont été observés sur certaines parcelles n'ayant pas reçu de fumure organique ni minérale. Ces bilans positifs en azote peuvent être imputables au gain d'azote par pluies atmosphériques ou par entraînement sur les parcelles d'engrais par les eaux de pluies, ou même par les fèces d'animaux externes laissées sur les parcelles en saison sèche durant la vaine pâture. En outre la minéralisation progressive de la matière organique dans le temps après deux ou trois ans d'apport de fumure organique peut expliquer ces bilans. Knoden et *al.* (2007) ont attesté que la totalité de l'azote présente dans la matière organique n'est pas directement valorisable par les plantes l'année de l'épandage. Aussi plusieurs auteurs (Dakuo, 1991 ; Hien et *al.* 1992 ; Sedogo, 1993) ont montré que la minéralisation de la matière organique libère progressivement des éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore etc. qui enrichissent le pool minéral du sol.

Les tableaux V, VI et VII ont montré que les sorties simulées par le modèle ne corroborent pas les données mesurées expérimentalement. Les apports de FO simulés par le modèle au niveau des parcelles de maïs sont pour la plupart supérieurs aux apports réels. Aussi les bilans minéraux simulés par le modèle diffèrent de ceux mesurés expérimentalement. Dans l'ensemble (module fertilisation), les sorties simulées par le modèle s'éloignent de la réalité et mettent en évidence un probable problème de paramétrage. Néanmoins le modèle permet de mettre en évidence les déséquilibres entre importations et exportations à l'échelle de l'exploitation qui peuvent à moyen terme, si ils ne sont pas compensés par des sources externes d'éléments minéraux (vaine pâture...) entraîner une baisse de la fertilité des sols. En ce qui concerne les apports de FO, le modèle reste un bon outil de conseil car il permet aux producteurs de connaître le potentiel de production de fumure organique de leur exploitation lorsque le troupeau est géré de façon plus rationnelle et par là de voir l'impact potentiel sur les bilans minéraux.

3.3. Validation du module économique (charges liées à l'agriculture)

Les tableaux VIII et IX présentent les indices statistiques obtenus en faisant la comparaison entre les charges simulées à celles mesurées. Les NRMSE des charges liées aux herbicides, insecticides et charges totales sont très proches de leurs valeurs optimales (0%). On note aussi une très forte corrélation entre les données simulées et celles mesurées car le *r* est quasiment égale à la valeur optimale au niveau des trois charges.

Tableau VIII : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes charges économiques liées à l'agriculture (Koumbia)

Indices	Ch herbi	Ch Insect	Ch T	Valeur optimum
Nb P	14	14	14	
M mesurée	100 976	660 467	395 477	
M simulée	102 081	659 984	396 110	
NRMSE	4%	1%	3%	0%
r	0,99	0,99	0,99	1
signification r	TFC	TFC	TFC	

Ch : charges ; herbi : herbicide ; insect : insecticide ; T : totale

Tableau IX : Valeurs des indices statistiques calculées pour les différentes charges économiques liées à l'agriculture (Kourouma)

Indices	Ch herbi	Ch Insect	Ch T	Valeur optimum
Nb P	12	12	12	
M mesurée	115 133	597 036	687 092	
M simulée	116 479	599 196	695 530	
RMSE	4%	0,3%	4%	0%
r	0,99	1	0,99	1
signification r	TFC	TFC	TFC	

Ch : charges ; herbi : herbicide ; insect : insecticide ; T : totale

L'analyse des tableaux VIII et IX nous permet de conclure que les charges économiques simulées liées à l'agriculture sont semblables à celles mesurées. En effet, les charges ne sont pas réellement simulées mais simplement rentrées par l'utilisateur au niveau du modèle à partir des cahiers de suivi, ce qui explique cette forte correspondance entre les données simulées et mesurées. Nous nous sommes limités aux charges liées à l'agriculture car l'évaluation réelle du produit brut chez les producteurs n'a pas pu être effectuée. En effet, les ventes réelles des productions agricoles par les producteurs sont échelonnées tout au long de l'année ce qui rend difficile leur évaluation pratique au jour le jour. De plus le gain économique lié à la production de coton graine n'est pas versé aux producteurs immédiatement après la campagne hivernale. Ce qui a amené à ne comparer que les charges simulées/mesurées liées à l'agriculture.

IV. Discussion générale

Savary (1994), a montré que les systèmes agricoles sont d'une complexité telle qu'il est impossible d'envisager dans le cadre d'un modèle de prendre en compte toutes les relations existantes. Ainsi, dans notre étude, certains facteurs non pris en compte par le modèle peuvent expliquer les différences constatées entre données réelles et virtuelles. Dans le module système de culture, les productions en grain de maïs, coton et sorgho mesurées expérimentalement sont supérieures à celles simulées. Cette situation est vraisemblablement liée aux pratiques de fertilisation organique et minérale sur les cultures non prises en compte au niveau du modèle dans le calcul des rendements. Aussi, d'autres facteurs (abiotique et biotique) ont pu influencer négativement ou positivement la production agricole dans les deux villages de l'étude.

Dans le module fertilisation, les apports virtuels de fumure organique sur les parcelles de culture se sont éloignés de la réalité. Aussi au niveau des bilans minéraux, plusieurs facteurs (abiotiques et biotiques) non pris en compte par le modèle ont pu contribuer à creuser l'écart entre les bilans minéraux virtuels et ceux mesurés expérimentalement de même qu'un mauvais paramétrage pour le calcul des exportations et importations des éléments minéraux.

Au niveau du module économique, seules les charges liées à l'agriculture ont été considérées et les résultats ont montré que les charges simulées étaient conformes à celles notifiées par les producteurs.

Au regard de nos résultats, il convient de revenir sur le contexte et l'objectif majeur de la conception du simulateur. En effet, le simulateur a été conçu pour servir d'outil de conseil et d'aide à la décision. L'objectif n'est donc pas de reproduire exactement la réalité mais de présenter des tendances engendrées par la modification des pratiques pouvant faire l'objet de discussion entre les utilisateurs (conseillers agricoles) et les producteurs. Chatelin et *al.* (1994), dans leur étude sur la modélisation du fonctionnement de l'agro-système, mentionnent qu'il est nécessaire de disposer d'outils d'aide à la décision mais qu'il est plus efficace, d'aider l'acteur à se construire sa solution plutôt que de lui fournir une seule stratégie, fut-elle théoriquement optimale. Et Aubry (2007), d'insister sur le fait que la « transformation » en modèles informatisés des représentations conceptuelles des décisions n'a pas forcément pour but de « résoudre un problème », « d'aider à la décision » d'un acteur réel, mais plutôt d'aider à la réflexion sur des modifications décisionnelles. Ainsi, nous pouvons au regard du contexte dans lequel le modèle a été créé et vu les résultats de nos travaux sur les modules « systèmes de culture et économique » valider partiellement le modèle. Il peut d'ores et déjà aider les producteurs à réfléchir sur leurs stratégies de gestion de leurs exploitations et la planification de la campagne agricole. Mais il convient de souligner que des améliorations du modèle doivent être apportées pour une meilleure modélisation de la réalité. Pour ce faire, une recalibration du module système de culture prenant en compte l'apport de fertilisants organiques et minéraux dans l'élaboration du rendement virtuel permettra une amélioration des sorties de ce module. Au niveau du module fertilisation, les termes « quantité de FO apportée aux cultures » et « quantité d'éléments minéraux totaux apportée aux cultures » peuvent être remplacés respectivement par « quantité potentielle de FO pouvant être apportée aux cultures » et par « quantité potentielle d'éléments minéraux totaux pouvant être apportée aux cultures » afin de mieux rendre compte des types de sorties qu'engendre ce module. Aussi, pour les sorties au niveau des bilans minéraux, on peut envisager une représentation par des signes « - » les bilans négatifs et par des signes « + » les bilans positifs sans préciser de valeurs chiffrées puisque l'enjeu est d'analyser les tendances et non pas la valeur précise qui, compte tenu des simplifications est forcément erronée. Pour conclure, les futurs utilisateurs du modèle doivent avoir une connaissance des différentes simplifications et limites du modèle afin de pouvoir bien analyser les sorties qui peuvent servir de support de discussion avec les producteurs cherchant à modifier leurs pratiques.

V. CONCLUSION

Cette analyse a permis de vérifier la validité d'un modèle de simulation du fonctionnement de l'exploitation à travers une comparaison des sorties (des modules système de culture, fertilisation et économique) simulées à celles mesurées expérimentalement. Il ressort donc de cette comparaison, une différence significative entre la production simulée en grain du coton et grain du maïs, du sorgho et du niébé à celle mesurée. Aussi, les apports par simulation de fumures organiques et d'éléments minéraux ainsi que les bilans minéraux simulés se sont éloignés des valeurs observées. Par contre les charges simulées liées à l'agriculture se sont révélées quasiment concordantes à celles enregistrées sur le terrain. Mais il faut noter

que les productions agricoles simulées sont corrélées aux productions mesurées témoignant ainsi que le modèle est capable de rendre compte des tendances existant entre systèmes.

Nous pouvons donc valider le modèle comme outil de réflexion pour la gestion de leurs exploitations par les producteurs. Mais avant d'être mis à la disposition des utilisateurs il faut que certaines améliorations soient apportées et que les utilisateurs soient informés sur ses simplifications et ses limites.

Au terme de notre analyse et à la lumière des résultats obtenus, nous pouvons formuler quelques recommandations : (i) pour une meilleure simulation de la production agricole, un ré-calibrage du module système de culture en tenant compte de l'apport de fumure organique et minérale dans l'élaboration du rendement virtuel est nécessaire ; (ii) une introduction d'une relation entre les bilans minéraux et la production agricole simulée permettra de mieux prendre en compte les différentes exportations d'éléments minéraux par les cultures. En terme de perspective d'étude, le modèle de simulation après correction sera comparé à deux autres modèles (un modèle de simulation pluriannuelle du fonctionnement de l'exploitation à base de règles de décision et un modèle de programmation linéaire à l'échelle de l'exploitation optimisant les ressources disponibles pour une maximisation du revenu). Il s'agira d'analyser les intérêts et limites de ces trois approches contrastées de modélisation de l'exploitation agricole dans des perspectives d'accompagnement à la co-conception de systèmes agropastoraux innovants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Addiscott T.M. and Whitmore A.P., 1987. Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. *J. Agric. Sci. (Cambr.)*, 109: pp 141-157.
- Ahn P.M., 1993. Tropical soil and fertiliser use. *Intermediate tropical- Agriculture series*, 252 p
- Amas., 1999. Crop modelling/ Simulation: An overview. Mauritius Sugar Industry Research Institute. B F Cheeroo-Nayamuth, pp 11-26.
- Andrieu N., Dugue P., Le Gal P.Y. et Schaller N., 2009. Modéliser le fonctionnement d'exploitations agricoles de polyculture élevage pour une démarche de conseil. Cas de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso. *In : Colloque/ Savanes africaines en développement : innover pour durer. Garoua - Cameroun, 20-24 avril 2009*, 12 p.
- Aubry C., 2007. La gestion technique des exploitations agricoles composante de la théorie agronomique. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Institut National Polytechnique de Toulouse, 101 p.
- Bacye B., 1993. Influence des systèmes de culture sur l'évolution du statut organique et minéral des sols ferrugineux tropicaux et hydromorphes de la zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III. ORSTOM, Montpellier, 243 p.
- Bado B.V., 2002. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéennes et soudaniennes du Burkina Faso. Thèse de doctorat du troisième (3^{ème}) cycle, Université Laval du Québec, 148 p.
- Bado B.V., Lompo F. et Sedogo M.P., 1997a. Efficacité d'un phosphatage de fond sur la productivité d'un sol ferrallitique. *In : Gestion de la fertilité des sols dans les systèmes d'exploitation d'Afrique de l'Ouest. 4-8 mars 1997* ; pp 85-88.
- Bado, B.V., Lompo F., Sedogo M.P. et Hien, V., 2000. Comment fertiliser les céréales à moindre coût: le Burkina phosphate comme alternative. 4^e Ed. FIRSI, pp1-19.
- Bamba C., 2008. Programmation d'algorithmes d'estimation et d'évaluation de modèle non-linéaire implantés sous la plate forme Record. INP-Toulouse/ENSAT/INRA, 81 p.
- Blanchard M., 2005. Relations agriculture élevage en zone cotonnière : territoire de Koumbia et waly, Burkina Faso. Créteiln Mémoire DESS, Université Paris XII, Val de Marne, 63p + annexes.
- Bouazzama B., Xanthoulis D. et Bouaziz A., 2007. Validation du modèle SIRMOD pour améliorer les performances de l'irrigation de la luzerne par la Robta au niveau du périmètre du Tadla. *HTE (136) C*, pp 8-16.
- Boyer J., 1982. Les sols ferrallitiques Tome x. Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Initiation-documentation technique n°52, ORSTOM-Paris, 384 p.
- Chatelin M.H., Moussej T. and Papy F., 1994. Farmers' decision making. A description approach. *In : B.H. Jacobsen, D.E. Pedersen, J. Christensen and S. Ramunsen (éd.) : Proc. 38th EAAE Seminar*, pp 369-381.
- CORUS, 2007. Rôle de la modélisation pour la gestion durable systèmes de production coton-céréales-élevage en Afrique de l'Ouest. Document de projet, 12 p.
- Cournut S., 2001. Le fonctionnement des systèmes biologiques pilotés : simulation à évènements discrets d'un troupeau ovin conduit en trois agnelages en deux ans, Lyon 1.
- Cros M.J., Duru M., Garcia F. and Martin-Clouaire R., 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie* 23: pp 105-122.
- Daho B., 2006. Dynamique des systèmes agropastoraux dans l'Ouest du Burkina Faso : cas des relations agriculture-élevage dans le terroir de Kourouma. Mémoire de fin d'études IDR/UPB, 77 p + annexes.
- Dakuo D., 1991. Le maintien de la fertilité des sols dans les systèmes de culture conduits en motorisation intermédiaire : cas de la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso. 49 p.
- Dakuo D., Hien V. et Koulibaly B., 1995. Gestion des résidus de récoltes dans l'intensification de la production agricole. Communication présentée à l'atelier régional sur les étables fumières en milieu paysan, du 13 au 17 Fev. 17 p
- Diallo M., 2006. Savoirs locaux et pratiques de conduite des troupeaux au pâturage : Elaboration d'une méthode d'étude. Mémoire de DEA IDR/UPB, 70p + annexes.
- Dzotsi A.K.A., 2002. Le Modèle CERES-Maize de DSSAT pour l'Analyse de Stratégie de Semis chez le Mais. Mémoire d'Ingénieur Agronome, IFDC Afrique/ESA –UL, 103 p.
- Fox D.G., 1981. Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 62: pp 599-609.

- Hien V., Youl S., Sanou K., Traore O. et Kabore D., 1992. Rapport de synthèse des activités du volet expérimentation du « Engrais vivriers » 1986-1991, 184 p.
- INERA/CIRDES, 1997. Etude des systèmes d'élevage de la zone de Sidéradougou. Rapport de recherche. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, Inera/Cirdes, 60 p.
- Knoden D., Lambert R., Nihoul P., Stilmant D., Pochet P., Cremer S. et Luxen P., 2007. Les livrets de l'agriculture : Fertilisation raisonnée des prairies. N°15, 48 p.
- Kobayashi K. and Us Salan M., 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal* 92 : pp 345-352.
- Koulibaly B., 1992. Effet de la fertilisation sur l'enracinement et la nutrition minérale du cotonnier. Mémoire de Fin d'étude, diplôme d'Ingénieur, option Agronomie. Université de Ouagadougou - ISN/IDR. 113 p.
- Lhoste P., 1988. Etude de l'élevage dans le développement des zones cotonnières. Maisons-Alfort, France, Cirad-Iemvt.
- Monteith J.L., 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy journal* 88: pp 695-697.
- N'Diaye M. et Sidibe M., 1999. Recherche de formule d'engrais NPK économiquement rentable pour la culture du maïs pluvial dans le centre sud du Sénégal.
- Pieri C., 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherches et de développement au sud du sahara. Ministère de la coopération française et CIRAD/IRAT (Montpellier), 444 p.
- Savary S., 1994. Système, modèle, simulation : Applications des concepts de l'analyse des systèmes en protection des cultures. Actes de séminaire international, Montpellier, pp 141-156.
- Schaller N., 2008. Analyse et modélisation des relations agriculture – élevage au sein d'exploitations cotonnières dans l'Ouest du Burkina-Faso. Mémoire d'ingénieur agronome. AgroParisTech, 108 p.
- Sedogo M.P., 1981. Contribution à la valorisation des résidus cultureux en sols ferrugineux et sous climat tropical semi- aride. (Matière organique du sol et nutrition azotée des cultures). Thèse Docteur- Ingénieur, INPL Nancy, 195 p.
- Sedogo M.P., 1993. Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse d'Etat, FAST/Université nationale de Côte d'Ivoire, 345 p.
- Woodward S.J.R. and Rollo M.D., 2002. Why pasture growth prediction is difficult. *Agronomy N.Z.* 32: pp 17-26.